

固定床热风干燥模式对荔枝干制特性的影响

胡卓炎, 狄飞达, 赵雷, 余小林

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 采用固定物料位置固定热端(模式 I)、变换物料位置固定热端(模式 II)和固定物料位置变换热端(模式 III)三种模式对荔枝果实进行固定床热风多阶段干燥, 分别测定了不同物料层(A、B 和 C 三层)物料的热风风速、温度、水分含量、干燥速率、有效扩散系数(D_{eff})和体积收缩率。结果表明, 不同的干燥层物料的热风和温度分布不均匀。经过四阶段共 26 h 干燥, 模式 I、II 和 III 中整体样品的水分含量分别为 45.70%、42.07% 和 41.18%。模式 I 中 A 层物料的终水分含量为 28.44%, 显著低于 B 层和 C 层样品 ($p < 0.05$), D_{eff} 为 $1.48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 显著大于 B 层和 C 层物料 ($p < 0.05$)。模式 II 各层间物料终水分含量和 D_{eff} 差异不显著 ($p > 0.05$), 干燥较均匀。模式 III 中 A 层物料的终湿基含水量和 D_{eff} 与 B、C 层的物料的相比差异不显著 ($p > 0.05$), 干燥较均匀, 可实现简约操作和规模加工。

关键词: 荔枝; 固定床; 干燥模式; 干燥特性

文章编号: 1673-9078(2013)9-2173-2179

Effect of Fixed-bed Convection Drying Mode on Drying Characteristics of Litchi Fruit

HU Zhuo-yan, DI Fei-da, ZHAO Lei, YU Xiao-lin

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Effects of different fixed-bed convection drying practices including fixed position of sample layer (model I), shifting position of sample layer (model II) and shifting hot air flow direction (model III) on the drying behaviors were determined, such as hot air velocity, temperature distribution, moisture content, effective diffusion coefficient (D_{eff}) and volume shrinkage of litchi sample layer A, B and C. Results indicated that both hot air velocity and temperature were non-uniformly distributed within different sample layer during drying. After 26 h of four stages drying, moisture contents of bulk sample of model I, II and III were 45.70%, 42.07% and 41.18% respectively. For the model I, the moisture content and D_{eff} value in sample layer A were 28.44% and $1.48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively, which was significantly different from that of sample layer B and layer C ($p < 0.05$). For the model II and III, more uniform drying behaviors were observed. The moisture content and D_{eff} value in sample layer A showed a little significantly difference compared to sample layer B and layer C ($p > 0.05$). Especially for the model III, less operation procedure was achieved, which was feasibility for industrial application.

Key words: litchi; fixed-bed; convection drying model; drying characteristic

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 属于典型的热带亚热带水果, 世界荔枝主产国以南北半球为界, 北半球有中国、印度、孟加拉国、尼泊尔、越南、泰国、以色列等。南半球有马达加斯加、南非、澳大利亚、巴西、毛里求斯等, 中国是世界最大的荔枝生产国, 栽培面积和产量均居全球之首^[1]。目前, 中国的荔枝年产量已接近 $2 \times 10^9 \text{ kg}$ 。

荔枝营养丰富, 经济价值高, 但是由于荔枝果实

在高温季节成熟, 其采后生理代谢极其旺盛以及常感

收稿日期: 2013-05-06
基金项目: 国家荔枝龙眼产业技术体系项目 (GARS-33-15); 广东省科技计划项目 (2012A020100005)

作者简介: 胡卓炎 (1961-), 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏

染一些微生物和病害导致荔枝果实不耐贮藏, 加上收获期短而上市集中, 造成荔枝鲜果商品化程度低, 市场鲜销压力大, 因此对荔枝的加工是十分必要的, 荔枝干是最普遍的加工产品之一^[2~5]。

典型的固定床热风干燥 (Fixed-bed Convection Drying) 一般采用燃气或其他热源加热空气, 由风机将热空气鼓送与物料直接接触进行热交换实现干燥。这种干燥方式优点是设置简单, 装载物料可达 2000 kg 左右, 适合农户小型的干制加工, 泰国小型农户对荔枝龙眼的干燥普遍采用此设备^[6], 缺点是物料干燥不均匀, 其中果实的水分含量和干制品颜色存在很大的差异, 人工翻转物料时, 耗费劳力, 效率低, 又极易导致果皮破损。为了克服这种干燥方式的缺点, 已有

研究尝试采用大型网筛将固定床的物料分成几层, 在干燥过程中定时通过吊车将整层物料挪动和换位, 以改善干燥效果^[6]。

在国内, 荔枝干传统加工多数采用烘灶或小型电热或燃煤热风干燥设备, 属于小规模分散加工。目前已有企业利用固定床干燥模式, 对干燥工艺和设备进行改良, 单台设备一次投料量可达 20×10^3 kg 以上, 实现了工业规模的荔枝干制加工。但目前国内对固定床热风干燥的特性及其品质变化规律的研究还不多, 研究结果也鲜见于文献报道。本研究基于固定模式、变换物料位置和变换热端三种固定床热风干燥模式对荔枝干制特性的影响开展研究, 旨在为固定床热风干燥设备与工艺的优化提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

以荔枝为实验材料, 品种为怀枝, 产地为广州从化。选择果大、肉厚、含糖量高的新鲜成熟荔枝, 去除枝梗、叶片、剔除病虫果, 清洗沥干。在 $3 \sim 5$ °C 冷库进行贮藏, 使用当天在常温下放置适当时间以达到室温^[7], 进行下一步处理。

1.2 主要仪器设备

电热恒温鼓风干燥箱 (DHG-9425A), 上海一恒科学仪器公司; 多路温度巡检仪 (JK1016U), 常州市

金艾联电子科技有限公司; 热风风机 (EP-18060 EX, Comnnwalth™ Rotary Fan); 风速计 (AR816, SMART SENSOR)。

1.3 试验方法

1.3.1 固定床多层热风干燥

根据电热烘箱的空间, 设计和制作底部带网筛 (孔径 5 cm) 的木框烘盘 (长 57 cm, 宽 49 cm, 高 10 cm), 由三个烘盘组合成固定床热风干燥设施^[6], 并加装热风鼓风机。装载 A、B、C 三层荔枝, 每层约 12.50 kg, 每一层标记 16 个整果, 均匀分布在各个干燥层, 如图 1 所示。其中, 每隔 2 h 测定各层标记的 16 颗整果的重量后迅速放回原处; 每隔 2 h 随机取各层的 5 颗整果进行其他相关指标的测定。

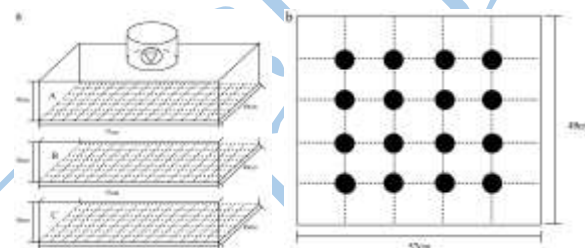


图 1 固定床热风干燥层和取样点示意图

Fig.1 Scheme diagram of sample layer and sampling point for fixed-bed Convection Drying

注: a-干燥层; b-取样点。

1.3.2 固定床热风干燥模式设计

固定床热风干燥模式设计见表 1。

表 1 固定床热风干燥模式设计表

Table 1 Design of fixed-bed Convection Drying model

干燥阶段	模式 I (固定模式)				模式 II (变换位置模式)				模式 III (变换热端模式)			
	一	二	三	四	一	二	三	四	一	二	三	四
各阶段时间/h	8	8	6	4	8	8	6	4	8	8	6	4
上层	A	A	A	A	A	C	B	A	ACAC	ACAC	ACAC	AC
中层	B	B	B	B	B	B	C	B	B	B	B	B
下层	C	C	C	C	C	A	A	C	CACA	CACA	CACA	CA

模式 I (固定模式)^[5,8]: 第一阶段干燥, 在 80 °C 下烘 8 h, 然后在常温下回湿 12 h, 继续进行第二阶段干燥即在 80 °C 下干燥 8 h, 再次在常温下回湿 12 h, 然后进行第三阶段干燥即 80 °C 干燥 6 h, 最后在 70 °C 温度下干燥 4 h。

模式 II (变换位置模式)^[6]: 第一阶段与传统干燥模式 I 相同, 第二阶段将 C 层荔枝与 A 层荔枝换位位置, 第三阶段将 C 层荔枝与 B 层荔枝调换, 第四阶段恢复到第一阶段的干燥层。

模式 III (变换热端模式): 根据目前国内工业规模荔枝干制加工企业所采用的干燥模式, 在第一阶段和

第二阶段干燥过程中, 每隔 2 h 变换热端和冷端 (即 A 层荔枝与 C 层荔枝变换); 在第三阶段干燥过程中每隔 1.5 h A 层荔枝与 C 层荔枝调换; 第四阶段最后 4 h 干燥每隔 2 h A 层荔枝与 C 层荔枝调换。

1.4 指标测定

1.4.1 温度测定

将热电偶分别放置和固定在出风口、各干燥层表面及其相应位置的果实内部 (将热电偶插入进果肉), 测定干燥过程中各干燥层热风温度、果肉温度及出热风温度的变化。温度数据通过 RS323 接口连接计算

机实现自动记录。

1.4.2 热风速率测定

测定干燥过程中出风口热风风速及干燥烘盘各干燥层中心点、中心点与色对角线约二分之一位置点（前左、前右、后左、后右共5个点）的表面热风风速(m/s)。

1.4.3 水分含量和分布测定

抽取各阶段各干燥层标记的荔枝，利用恒重法测定其水分含量^[9]，以湿基或干基水分含量表示。

1.4.4 干燥速率测定

干燥速率的定义为单位时间内每单位面积（物料和干燥介质的接触面积）湿物料汽化的水分质量^[10]。当物料与干燥介质的接触面积不易确定时，用干燥强度表示干燥速率，其定义为物料湿含量随时间的变化率，通常用 N_d 表示，使用干燥强度的公式表示干燥速率。单位为 $g_{(水)}/(g_{(绝干物料)} \cdot h)$ 计算公式如下：

$$N_d = -\frac{dM_m}{dt} = -\frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{t_{i+1} - t_i}$$

注： N_d ：干燥速率， $g_{(水)}/(g_{(绝干物料)} \cdot h)$ ； M_m ：干基含水率，%； $M_{d,i}$ ：时间为 t_i 时干基含水率，%； $M_{d,i+1}$ ：时间为 t_{i+1} 时干基含水率，%。

1.4.5 有效扩散系数测定

干燥过程中物料内部水分有效扩散系数按下式进行计算^[11~12]：

$$\ln MR = \ln \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{R_0^2} \right)$$

注：MR 为水分率，无因次量； M_0 、 M_t 、 M_e ：样品初始、t 时刻和平衡水分含量，g 水分/100 g 干物质； R_0 为颗粒半径，m；t 为干燥时间，s； D_{eff} 为物料内部水分的有效扩散系数， m^2/s 。将试验数据代入式中，可得出以 $\ln MR$ 及时间 t 为坐标的直线，直线的斜率即为 $-(D_{eff} \pi^2)/R_0^2$ ，进一步得出有效扩散系数 D_{eff} 值。

1.4.6 体积收缩率测定

采用排空法测定样品的体积，以样品干燥前后的体积比表示其收缩率，如下式：

$$s = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100\%$$

注：S 为收缩率，无因次量； V_0 和 V_t 分别为样品初始和 t 时刻的体积， cm^3 。

1.5 数据处理

数据统计：采用 SAS 统计软件进行邓肯氏均数差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 固定床热风干燥热风风速和温度的分布

2.1.1 热风速率分布特性

表 2 固定床热风干燥不同位置点的风速分布

Table 2 Hot air velocity distribution in different sample layer of fixed-bed convection dryer

位置	固定床物料层中心点及其与对角线 1/2 处的风速 / (m/s)				
	左前	左后	中心点	右前	右后
风口	-	-	9.90	-	-
上层	0.30	0.30	6.30	0.30	0.60
中层	0.20	0.20	1.80	0.10	0.30
下层	<0.10	<0.10	0.40	<0.10	<0.10

从表 2 结果可以看出，从热端的上层到下层，风速衰减明显，中心点的风速从 6.3 m/s 减小到 0.4 m/s，并且中心周围的风速与中心风速差距很大，因此同一层的物料干燥也是不均匀的。

2.1.2 热风温度及果肉温度变化特点

测定传统的固定床热风干燥模式各物料层在不同的干燥阶段的热风温度和果肉内部温度的变化，结果见图 2。

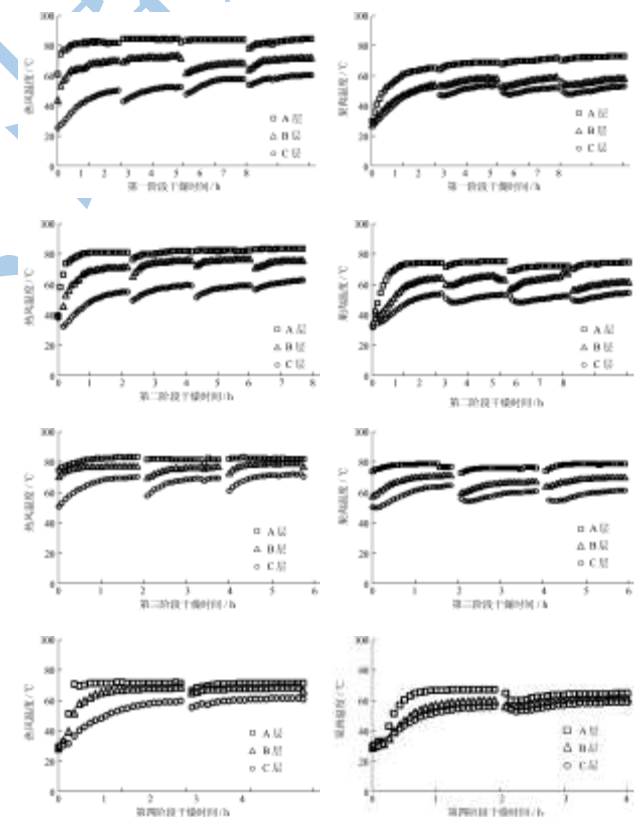


图 2 固定床热风干燥各物料层在不同干燥阶段的热风温度和果肉温度变化

Fig.2 Temperature distribution of surface hot air and interior of litchi fruit in different sample layer during fixed-bed convection drying

第一、二和三阶段的干燥温度设定为 80 °C。实测

温度结果表明,除干燥过程中每隔 2 h 的取样点因开启干燥箱引起的温度波动外,在第一阶段,各层物料的表面热风温度基本保持稳定,上层、中层和下层的热风温度分别约为 80、70 和 58 °C,相对应上、中和下层果肉内部的温度约为 67、55 和 50 °C。一般认为,当干燥过程中只采用热空气作为干燥介质时,只要物料表面有足够的水分蒸发,物料温度就不可能高于热空气的温度^[4]。由于固定床干燥的热风由风机鼓送与物料直接接触,造成热端接触面的温度高于冷端位置的温度,所以上、中、下层果肉的温度差异较大,这是造成传统的固定床热风干燥不均匀的一个重要原因。而在第二、三个阶段,下层的环境热风温度上升至 67 °C 左右;上、中层的果肉温度进一步提高,分别约为 77 °C、67 °C,而下层果肉的温度也开始上升到约 60 °C。

第四阶段过程中,干燥温度设定为 70 °C,此时上、中层物料表面的热风温度分别约为 70 °C、68 °C,下层环境温度保持在 60 °C 左右;上、中、下层果肉内部温度分别保持在约 65 °C、60 °C、55 °C,彼此相差约为 5 °C,差异缩小。

结果表明,不同干燥层的热风风速、物料表面和果肉内部温度存在明显的差异,导致干燥效果的不一致,可以更好的解释荔枝多层干燥中不同干燥层物料水分含量差异的原因。

2.2 不同干燥模式对物料的水分含量及干燥速率的影响

荔枝果实由外果皮、内果皮、果肉和果核形成非均质的结构,尤其是内果皮是果肉水分向外果皮扩散的屏障,因此荔枝是一种较难干燥的物料。不同干燥模式对物料的水分含量及干燥速率的影响结果见图 3。

从图 3a 可知,干燥模式 I 下,A 层和 C 层物料始终为热端和冷端,A、B、C 层荔枝湿基水分含量下降幅度差异明显,各层干燥速率在也差异明显,A 层物料干燥速度快速上升至 0.50 g_(水)/(g_(绝干物料)·h),随后下降至 0.30 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)保持一定时间;B 干燥层的荔枝经历了升速、恒速、降速干燥阶段,恒速阶段干燥速率保持较低水平约为 0.12 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)左右;而 C 层物料,前 6 h 湿基含水量下降缓慢,干燥速率保持较低水平约为 0.10 g_(水)/(g_(绝干物料)·h),这反映出多层荔枝干燥过程中存在的干燥不均匀问题,故传统的固定床热风干燥方式下只能以少量荔枝作为加工对象,不能满足荔枝集中上市,大量加工的需求。

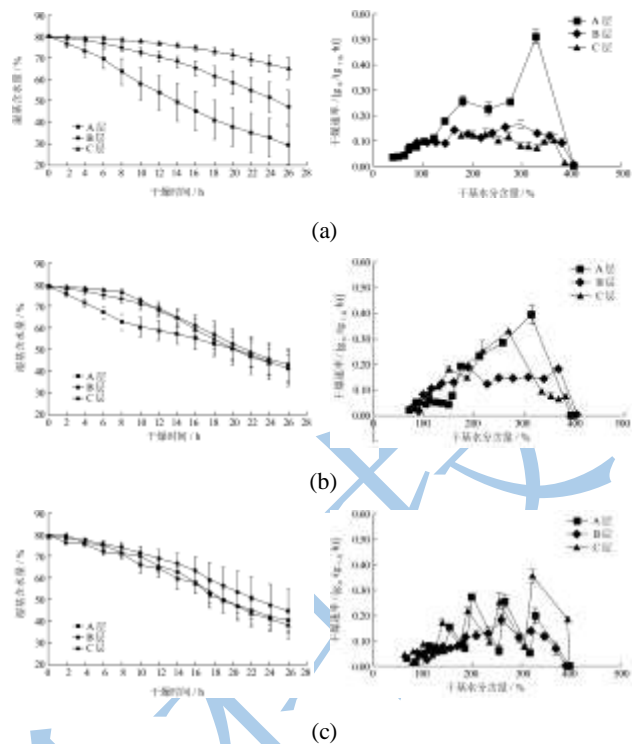


图 3 不同干燥模式下各干燥层物料湿基含水量及干燥速率变化

Fig.3 The moisture content and drying rate of sample from different sample layer and fixed-bed drying model

注: a-模式 I, b-模式 II, c-模式 III。

由图 3b 可知,干燥模式 II 是经过几次的变换位置操作,每层的物料都会有时间段处在热端,获得较高的温度和风速,有利于干燥的进行。位于热端的顺序是 A-C-B-A 层物料,冷端则为 C-A-A-C 层物料。前 8 h 的干燥情况与模式 I 干燥类似,A、B、C 三层的湿基含水量变化差异明显,A、B 层水分降低比 C 层明显。经过 8 h 的干燥之后,上中下层分别变为 C、B、A,此时 C 层荔枝含水量迅速下降,而 A 层下降开始缓慢;经历第三次换层之后,上中下层变为 B、C、A 层,此时三层的湿基含水量差异缩小,直至干燥终止。干燥速率方面,A 层干燥速率从最高 0.40 g_(水)/(g_(绝干物料)·h),经过前 8 h 的热端干燥之后,干燥速率急剧下降至 0.05 g_(水)/(g_(绝干物料)·h),并持续到最后;而 B 层的荔枝在前 12 h 处于比较恒速的干燥阶段,干燥速率约为 0.14 g_(水)/(g_(绝干物料)·h),进入 14 h 以后,干燥速率上升后也开始逐渐下降;C 层的荔枝在 8 h 的缓慢干燥之后,经历换层之后,干燥速率急剧上升,然后持续下降。三个层的荔枝最终干燥速率约为 0.02 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)。

由图 3c 可知,III 模式采取的是每隔 2 h (第三阶段是每隔 1.5 h) 变换热风端,所以从湿基含水量变化趋势可以看出,A、C 干燥层荔枝干燥速度湿基含水

量呈现交叉下降变化趋势,这是因为两层荔枝位于冷热端的交换,当荔枝处于热端时其湿基含水量下降较快,处于冷端时则较慢。从干燥速率可以看出,A、C两层的荔枝也是呈现交替变化,在前14h,A、C干燥层物料干燥速率在最大值0.36 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)和最小值0.06 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)之间变动,并随着时间的增加,干燥速率变化幅度逐渐减小,最终达到约0.04 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)。干燥26h之后,A、C干燥层荔枝的湿基含水量下降较多,B层的荔枝一直处于中层,总体来说水分下降的比较平缓。B层荔枝16h干燥时期内,干燥速率约为0.12 g_(水)/(g_(绝干物料)·h)。与模式I中层荔枝的最终湿基含水量和干燥速率接近。

2.3 不同干燥模式荔枝干燥过程中有效扩散

系数分析

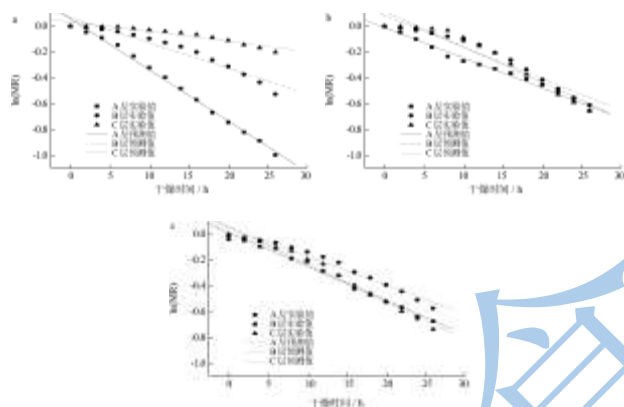


图4 不同固定床热风干燥模式各层物料水分率的对数值和干燥时间变化曲线

Fig.4 The curve of ln (MR) versus drying time of different model of fixed-bed convection drying

注: a-模式I, b-模式II, c-模式III。

图4和表3是不同固定床热风干燥模式各层物料水分率的对数值随时间变化的曲线和有效扩散系数数值。结果表明,在干燥过程中干燥模式I中A、B、C三层的有效扩散系数依次递减,差异明显(p<0.05);干燥模式II整体来说,各干燥层的水分扩散系数差异不显著(p>0.05),平均值约为0.87×10⁻⁶ m²/s。并且,各干燥模式不同干燥层的拟合系数R²均大于0.9,ln(MR)和干燥时间具有良好的线性相关。而模式III的水分有效扩散系数均值最大,约为0.93×10⁻⁶ m²/s,可能是热端位置的变换使得风速和温度的分布相对均匀,物料中的水分能够迅速蒸发,从而促进了水分扩散。从显著差异分析可以得知,各层物料水分扩散系数最均匀的为干燥模式II,其次是干燥模式III,差异最大的是干燥模式I。

表3 不同固定床热风干燥模式物料有效扩散系数 D_{eff}

Table 3 Effective diffusion coefficient (D_{eff}) of sample from different sample layer in fixed-bed convection drying

干燥模式	干燥层	拟合函数	R ²	D _{eff} (×10 ⁻⁶)/(m ² /s)
I (固定模式)	A	y=-0.0397x+0.0577	0.9944	1.48 ^a
	B	y=-0.0197x+0.0677	0.9386	0.71 ^b
	C	y=-0.0076x+0.0336	0.9054	0.29 ^c
II (变换位置)	A	y=-0.0233x-0.0101	0.9883	0.81 ^a
	B	y=-0.0244x+0.0837	0.9468	0.85 ^a
	C	y=-0.0274x+0.1148	0.9396	0.96 ^a
III (变换热端)	A	y=-0.0462x+0.0842	0.9912	0.96 ^{ab}
	B	y=-0.0381x+0.1001	0.9684	0.80 ^a
	C	y=-0.0502x+0.1259	0.9792	1.03 ^b

注:同一模式中不同干燥层的D_{eff}数据后带有不同小写字母,表示其差异显著,p<0.05。

2.4 不同干燥模式下荔枝干制样品的水分含量和分布

2.4.1 荔枝最终干燥各层湿基含水量比较

表4 不同干燥模式下各物料层荔枝干制样品的终水分含量(%)

Table 4 The final moisture content of sample from different sample layer in fixed-bed convection drying

干燥层	I模式/26h	II模式/26h	III模式/26h
A层	28.44±8.95 ^a	41.37±6.43 ^a	40.35±5.79 ^{ab}
B层	45.54±7.93 ^b	43.34±7.42 ^a	44.93±10.11 ^a
C层	63.11±5.06 ^c	41.50±8.14 ^a	38.27±6.09 ^b

注:同一列中数据后带有不同小写字母,表示处理间差异显著,p<0.05。

不同干燥模式下经过四个阶段共26h的干燥,荔枝样品的终水分含量见表4,根据表4中数据计算,干燥模式I总体样品终水分含量均值为45.70%,各物料层间物料干制不均匀,湿基含水量差异显著(p<0.05);而干燥模式II下,总体样品终水分含量均值为42.07%,各层物料最终湿基含水量无显著差异(p>0.05);而干燥模式III下,总体样品终水分含量均值为41.18%,A层与B、C层物料终水分含量差异不显著(p>0.05),与干燥模式I相比,明显提高了干燥的均匀性;与干燥模式II相比,则可免去翻转或移动物料的操作步骤,节省了劳力。

2.4.2 荔枝鲜果及各干燥模式下样品水分含量分布

荔枝鲜果及不同模式干制样品的湿基含水量分布见图5。

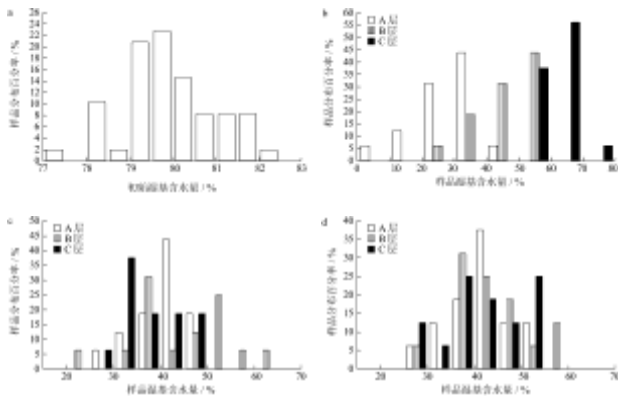


图 5 荔枝鲜果及不同模式干制样品的湿基含水量和分布

Fig.5 The moisture content and distribution of sample from fresh litchi and different fixed-bed convection drying model

注：a-鲜果、b-模式 I、c-模式 II、d-模式 III。

由图 5 可知，荔枝鲜果的含水量主要集中在 78~82%，荔枝鲜果湿基含水量分布呈正态分布。干燥模式 I 在经四个阶段共 26 h 干燥之后，A 层（热端）样品中有 75% 以上含水量分布在 20~35% 之间；B 层的荔枝中有约 80% 左右的样品含水量分布区间主要集中在 40~60% 之间；而 C 层即冷端，近 90% 的样品含水量集中分布在 60~70%。由此可知，传统的固定床热风干燥模式 I，最终的样品的水分含量差异大，样品干燥不均匀，如果不改变干燥物料的位置，则加工大量的物料是不现实的。相比于传统干燥模式 I，采用干燥模式 II 与干燥模式 III 的样品中水分均匀性得到加大提升，经 26 h 干燥之后，两模式的 A、B、C 三层的荔枝含水量主要集中在 35~40% 左右，并呈正态分布。

2.5 干制样品的体积收缩率

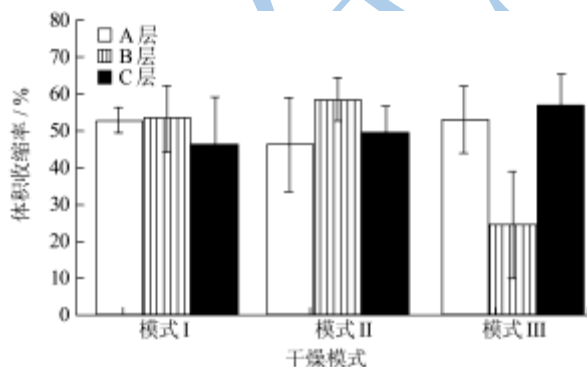


图 6 不同固定床热风干燥模式干燥样品的体积收缩率

Fig.6 The volume shrinkage of sample from different fixed-bed convection drying model

不同的固定床热风干燥模式下样品的体积收缩率见由图 6。干燥模式 I 和干燥模式 II 样品体积收缩率差异不大，各个层体积收缩率约为 51%，说明荔枝在干燥 26 h 之后，体积几乎减少了一半，从外观上已经有

了较大的改变；而干燥模式 III 下，A、C 层的荔枝与其他两种干燥模式下各层体积收缩率差异不大，但是 B 层的荔枝干收缩率约为 25%，小于其他干燥层，可能与 A、C 层的荔枝经过多次的热端和冷端交换，使得荔枝受热反差较大，导致荔枝果实水分含量明显下降，最终荔枝整果收缩明显，而 B 层荔枝一直处于中间，受热和风速较为均匀，不会受到温度的骤然上升导致收缩明显。

3 结论

3.1 比较固定床热风干燥三种不同模式对荔枝果实干制特性的影响，结果表明。固定床热风干燥设施中不同的干燥层物料的热风和温度分布不均匀，热端物料的风速和温度高于冷端。

3.2 经四阶段 26 h 干燥，干燥模式 I 由于热冷端和物料位置固定，样品平均水分含量为 45.70%，其中 A 层物料终水分含量为 28.44%，低于 B 层物料的 45.54% 和 C 层物料的 63.11%，差异显著 ($p < 0.05$)，干燥速率和 D_{eff} 则显著大于 B 层和 C 层物料 ($p < 0.05$)。干燥模式 II 在各干燥阶段 (6 ~8 h) 变换位置，样品平均水分含量为 42.07%，各层间物料终水分含量差异较小， D_{eff} 差异不显著 ($p > 0.05$)，干燥较均匀。干燥模式 III 操作相当于在较短时间内 (1.5~2 h) 变换热冷端，样品平均终水分含量为 41.18%，各层间物料最终湿基含水量差异较小，A 层物料的 D_{eff} 与 B、C 层的物料的 D_{eff} 相比差异不显著 ($p > 0.05$)，干燥较均匀，可实现简约操作和规模加工。

3.3 干燥模式 I、II 各层及模式 III 中的上下层物料的体积收缩率约为 50%。干燥模式 III 中的中层物料的体积收缩率最小，约为 25%。

参考文献

[1] 陈厚彬.中国荔枝现状和发展分析[J].世界热带农业信息, 2008,6:3-6
Chen Houbing. Analysis on the Development Status of Litchi Industry in China [J]. World Tropical Agriculture Information, 2008, 6: 3-6

[2] 孔凡利,张名位,尹凯丹,等.荔枝果实中营养元素的测定[J].现代食品科技,2012,3:351-353
Kong Fanli, Zhang Mingwei, Yin Kaidan, et al. Determination of Nutrient Elements in Litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 3: 351-353

[3] Janjai S, Precoppe M F, Lamlet N, et al. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Food and Bioprocess Processing, 2011, 89: 194-20

- [4] 易干军,王小兵,霍合强.中国荔枝出口的现状与对策[J].果树学报,2002,19(3):188-190
Yi Ganjun, Wang Xiaobing, Huo Heqiang. The Litchi Industry Status in China and Its Export Strategies [J]. Journal of Fruit Science, 2002, 19(3): 188-190
- [5] Precoppe M, Nagle M, Janjai S, et al. Analysis of dryer performance for the improvement of small-scale litchi processing [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2011, 46: 561-569
- [6] Nagle M, Gonzalez-Azcarraga J C, Phupaichitkun S, et al. Effects of operating practices on performance of a fixed-bed convection dryer and quality of dried longan [J]. International journal of food science and technology, 2008, 43(11): 1979-1987
- [7] Janjai S, Mahayothee B, Lamlert N, et al. Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi Chinensis* Sonn.) [J]. Journal of Food Engineering, 2010,96(2):214-221
- [8] 陈人人,刘清化,高旭辉,等.荔枝干的工厂化生产[J].广东农机,2000,1:14-16
Chen Renren, Liu Qinghua, Gao Xuhui, et al. Commercial Processing of Litchi Drying [J]. Guangdong Agricultural Machinery, 2000, 1: 14-16
- [9] 韩雅珊.食品化学[M].北京:中国农业出版社,1998
Hna Yashan. Food Chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998
- [10] 沈夏筠.荔枝热风干燥及包装贮藏技术研究[D]. 福建农林大学,2010
Shen Xiajun. Studies on Technologies of Hot Air Drying for Litchi Fruit and Packaging and Storage of Dried Litchi Fruit [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2010
- [11] H Y J, L J S, H G J. Determination of the Moisture diffusivity for Kinder bean seed thin layer drying [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(9): 211-214
- [12] 肖美添,朱艳,刘华信.薄层介质干燥过程内部水分扩散[J].华侨大学学报(自然科学版),2003,24(2):184-188
Xiao meitian, Zhu Yan, Liu Huaxin. Moisture Diffusion from Thin Layer Media during Drying Process [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2003, 24(2): 184-188
- [13] 李辉,林河通,赵云峰,等.荔枝果实加工新技术研究进展[J].包装与食品机械,2008,6:7-11
LI Hui, Lin Hetong, Zhao Yunfeng, et al. Research Advances of New Processing Technologies for Litchi Fruit [J]. Packaging and Food Machinery, 2008, 6: 7-11
- [14] Li Z H, Lin H M, Chen Y. Effects of different drying ways on polysaccharide content of *Codonopsis pilosula* [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007, 42(3): 64-67